

УДК 664.868: 582.272.1; 536.24:66.021.3/4:66.047.41

## Выявление кинетических закономерностей обезвоживания эктокарпуса при конвективном подводе тепловой энергии

Е. Ю. ЗАПОРОЖЕЦ, канд. техн. наук Е. В. ФОМЕНКО,

д-р техн. наук А. Х.-Х. НУГМАНОВ<sup>1</sup>,

д-р техн. наук И. Ю. АЛЕКСАНИЯН, д-р биол. наук А. В. КОТЕЛЬНИКОВ,

ВО ЧУНГ КУАНГ

Астраханский государственный технический университет

<sup>1</sup>E-mail: albert909@yandex.ru

Самыми широко востребованными в пищевой индустрии биополимерами являются полисахариды, например, натриевый альгинат (пищевая добавка E401) как анионная субстанция. Альгинат натрия зарекомендовал себя в качестве загустителя при производстве изделий в желе, соусах и заливках, используется как влагоудерживающий ингредиент в хлебе и хлебобулочных изделиях и др., причем бурые водоросли морской природы (ламинария и фукус) в современных условиях служат уникальным его индустриальным источником, в Каспийском бассейне к числу видов бурых водорослей, богатых на альгинаты, можно причислить семейство эктокарпусовых, поэтому объектом научного анализа послужил эктокарпус. В технологии выработки альгинатов из водорослей присутствует операция обезвоживания как исходного сырья, так и продуктов переработки, при этом, из всех процессов производства пищевых продуктов обезвоживание является самой энергозатратной процедурой. Итоговым результатом операции высушивания исходного сырья служит выработка материала с наилучшей пищевой ценностью, а также параметрами, наилучшими для ее сохранности. Определение рациональных режимных показателей влагоудаления из водорослей опирается на описание переноса тепловой энергии и массы, на физико-химических и кинетических закономерностях данной операции, поэтому целью исследования послужило исследование кинетики удаления влаги из эктокарпуса при конвективном подводе тепла для выявления его механизма и выявления рациональных режимов сушки. В итоге, в статье приведены результаты исследования кинетики удаления влаги из эктокарпуса при конвективном подводе тепла, выявлены механизма обезвоживания и выявлены рациональные режимы его сушки, причем характер кинетических закономерностей типичен для растительных сырьевых материалов с определенной спецификой, обусловленной параметрами объекта анализа, являющегося дисперсными частицами эктокарпуса цилиндрической формы, прошедшего этап предварительной подготовки к процедуре обезвоживания.

**Ключевые слова:** бурые водоросли, эктокарпус, альгинат, сушка, кинетические закономерности, математическое описание удельная производительность.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.02.2023, одобрена после рецензирования 19.04.2023, принята к печати 26.04.2023

DOI: 10.17 586/1606-4313-2023-22-2-68-74

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Запорожец Е. Ю., Фоменко Е. В., Нугманов А. Х.-Х., Алексанян И. Ю., Котельников А. В., Во Чунг Куанг. Выявление кинетических закономерностей обезвоживания эктокарпуса при конвективном подводе тепловой энергии. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 2. С. 68–74. DOI: 10.17 586/1606-4313-2023-22-2-68-74

## Identification of the kinetic regularities of ectocarpus dehydration under convective supply of thermal energy

E. Yu. ZAPOROZHEC, Ph. D. E. V. FOMENKO,

D. Sc. A. H.-H. NUGMANOV<sup>1</sup>,

D. Sc. I. Yu. ALEXANYAN, D. Sc. A. V. KOTELNIKOV, WO CHUNG KUANG

Astrakhan State Technical University

<sup>1</sup>E-mail: albert909@yandex.ru

The most widely used biopolymers in the food industry are polysaccharides, for example, sodium alginate (food additive E401) as an anionic substance. Sodium alginate has established itself as a thickener in the production of products in jelly, sauces, and fillings; it is used as a moisture-retaining ingredient in bread and bakery products, etc. In the Caspian basin, the ectocarpus family can be identified as the species of brown algae rich in alginates. Therefore, the ectocarpus served as the object of scientific analysis. The technology for the production of alginates from algae includes dehydration of both raw

*materials and processed products, dehydration being the most energy-consuming procedure of all food production processes. The final result for the drying of the feedstock is the production of material with the best nutritional value as well as the best parameters for its preservation. The determination of rational regime indicators of moisture removal from algae is based on a description of the transfer of thermal energy and mass as well as on the physicochemical and kinetic patterns of this operation. Thus, the purpose of the study was to study the kinetics of moisture removal from the ectocarpus during convective heat supply to identify its mechanism and identify rational drying modes. The article presents the results of a study of the kinetics of moisture removal from the ectocarpus with convective heat supply; the mechanism of dehydration and the rational modes of its drying are identified, the nature of the kinetic patterns being typical for plant raw materials with certain specifics due to the parameters of the object of analysis, which is dispersed cylindrical ectocarpus particles prepared for dehydration.*

**Keywords:** brown algae, ectocarpus, alginate, drying, kinetic patterns, mathematical description, specific productivity.

#### Article info:

Received 10/02/2023, approved after reviewing 19/04/2023, accepted 26/04/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-68-74

Article in Russian

#### For citation:

Zaporozhec E. Yu., Fomenko E. V., Nugmanov A. N.-H., Alexanyan I. Yu., Kotelnikov A. V., Wo Chung Kuang. Identification of the kinetic regularities of ectocarpus dehydration under convective supply of thermal energy. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 2. p. 68–74. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-2-68-74

### Введение

Самыми широко востребованными в пищевой индустрии биополимерами являются полисахариды, например, натриевый альгинат (пищевая добавка E401), как анионная субстанция. Данное вещество является гелеформирующим премиком для различных водных растворов при смешении их с натриевыми солями. Альгинат натрия зарекомендовал себя в качестве загустителя при производстве изделий в желе, соусах и заливках, используется как влагоудерживающий ингредиент в хлебе и хлебобулочных изделиях и др. [1]–[4]. Принимая во внимание данные работы [5], можно сделать заключение о том, что бурые водоросли морской природы (ламинария и фукус) в современных условиях служат уникальным промышленным источником альгината натрия. В отдельных государствах выработка альгината натрия проводится по специфическим технологическим путям, но в основе своей принципы извлечения альгината натрия из водорослевого сырья подобны.

В Каспийском бассейне преобладающими является диатомовое водорослевого сырья (292 типа), зеленое (139 типов), присутствующие преимущественно в пресной водной среде, а также реже в солоноватых и морских водных арелах, и сине-зеленое (203 типа) [6]. Иные его подвиды реже встречаются, так, например, присутствует 13 типов бурого водорослевого сырья, к которому можно причислить эктокарпус [7, 8], а учитывая, что к числу видов, богатых на альгинаты, являются бурые водоросли, то этот вид нитевидных водорослей семейства эктокарпусовых представляет особый интерес. Эктокарпус — макроскопическая (до 60 см) водоросль, нитчатая гетеротрихальная, имеющая вид ветвистых. Альгинаты образуют основной структурный полисахарид многих морских бурых водорослей и эктокарпус здесь не является исключением [9].

Итак, выявление комплекса энергетических и физических и химических явлений при предварительной обработке сырья из бурых водорослей, в частности, нитевидных водорослей семейства эктокарпусовых и последующем извлечении из них альгиновой кислоты, предпо-

деляет рациональную выработку природных пищевых премиков с определенными потребительскими показателями при падении энергоемкости процессов в технологии выработки альгинатов.

Из всех процессов производства пищевых продуктов обезвоживание является самой энергозатратной процедурой [10, 11]. Итоговым результатом операции высушивания служит выработка материала с наилучшей пищевой ценностью, а также параметрами, наилучшими для ее сохранности. Определение рациональных режимных показателей влагоудаления из водорослей опирается на описание переноса тепловой энергии и массы, на физико-химических и кинетических закономерностях данной операции [10].

### Цели и задачи исследования

Целью работы является исследование кинетики удаления влаги из эктокарпуса при конвективном подводе тепла для выявления его механизма и выявления рациональных режимов сушки.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужил эктокарпус в нативном, сухом и измельченном виде.

Принимая во внимание проведенный анализ, можно прийти к заключению о том, что для водорослевого сырья, в частности, эктокарпуса, относящегося к бурым водорослям, наиболее приемлемым способом обезвоживания является конвективный, реализуемый в сушильном устройстве барабанного типа. Для его рационализации резонно принять такие условия, при которых можно не только отвести влагу из влажного материала в этом аппарате, но и существенно сократить время на его сушку. К тому же для адаптации математической модели переноса тепловой энергии при ее конвективном подведении в течение операции влагоотнятия из водорослевого сырья, резонно нахождение закономерностей ее внутреннего трансфера, опирающихся на кинетике данной процедуры, которую выявляли для водорослевого сырья посредством вероятностно-статистических подходов к составлению плана опытной серии и обработки полученных результатов.

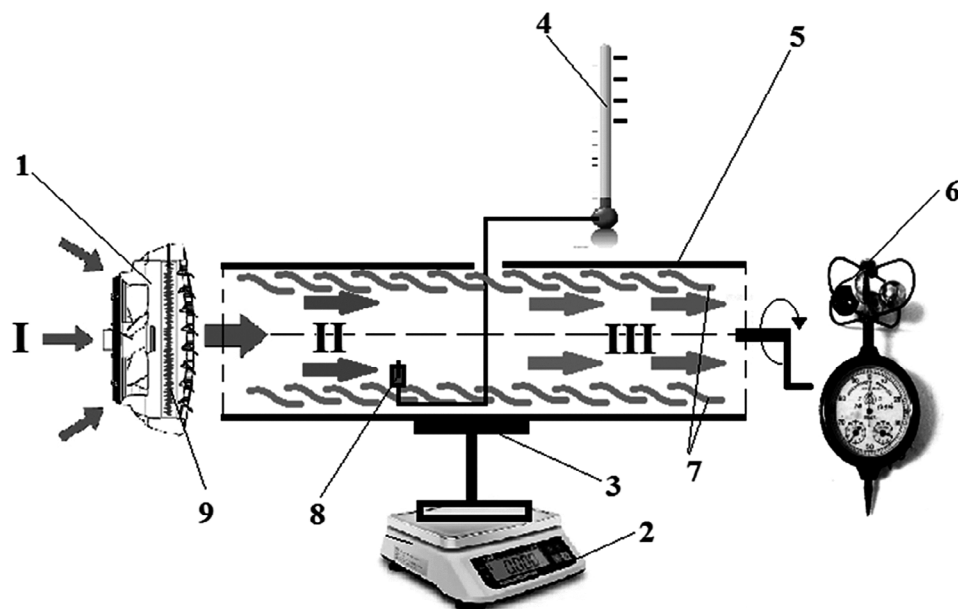


Рис. 1. Схематичное изображение опытного стенда: I — поток охлажденной воздушной среды; II — поток теплового агента с определенной интенсивностью движения и температурой; III — поток отработанного теплового агента

Fig. 1. Experimental stand: I — cooled air flow; II — heat agent flow with predetermined intensity and temperature; III — spent heat agent flow

Схематично опытный стенд для сушки водорослевого сырья в атмосферных условиях конвективного подведения теплоты показан на рис. 1, который сконструирован из: 1 — calorific unit; 2 — электронные весы; 3 — подвесное устройство для пробы; 4 — термический датчик; 5 — обечайка рабочего пространства; 6 — анемометр; 7 — проба; 8 — термический датчик; 9 — нагревательный узел calorific unit.

Конструктивное обеспечение опытного стенда дает возможность контролировать и регулировать режимные характеристики (температуру  $T$  и интенсивность перемещения теплоносителя). Температура сушильного агента ограничивается  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а скорость  $4,5\text{ м/с}$  в связи с технической возможностью применяемого в экспериментальной установке вентилятора calorific unit. Опытный стенд предусматривает осуществление ряда опытов, опираясь на данные которых адекватно реализуется модель, что дает возможность выявить рациональные параметры режима влагоудаления при обезвоживании водорослевого сырья.

Так как при проведении удаления воды из тонкоразмерного слоевища водорослевого сырья находят варьирование его текущей влажности  $W$  по его объему опытным путем обуславливает серьезные трудности, то с целью физического и математического описания кинетических зависимостей между влияющими на протекание

удаления влаги резонно реализовать получение и описание его кривых, иными словами, закономерность изменения средней по объему  $W$  в зависимости от времени течения операции.

За переменные факторы, определяющие интенсивность высушивания, были взяты длина слоевища водорослевого сырья ( $m$ ), так как его толщину можно принять постоянной, температура сушильного агента ( $K$ ) и его скорость ( $m/c$ ), сведенные в табл. 1.

Предварительные постановочные эксперименты показали, что при температуре сушильного агента выше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  конечная температура водорослевого сырья становится выше  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что негативно сказывается на качественные показатели сухого полуфабриката, а при его скорости выше  $2\text{ м/с}$  происходит унос влажного материала.

Что касается длины слоевища исследуемой водоросли, то очевидно, что данный параметр в зависимости от его варьирования конечно же влияет на скорость сушки, но только за счет увеличения торцевых поверхностей отдельных частей и потому это влияние хоть и присутствует, но является несущественным, ввиду малой площади торцевых поверхностей по отношению к площади цилиндрической поверхности частицы. В связи с этим, несмотря на то, что влияние длины слоевища водоросли на скорость ее обезвоживания теоретически и существу-

### Факторы, обуславливающие интенсивность удаления воды из водорослевого сырья

Таблица 1

#### Factors determining dehydration intensity of brown algae raw materials

Table 1

Исходная концентрация сухого остатка, кг/кг	Температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$	Интенсивность перемещения теплоносителя, м/с	Поперечный размер слоевища, м	Итоговая концентрация сухого остатка, кг/кг
0,08	60	1,0	0,005	0,82
	80	1,5	0,01	
	100	2,0	0,015	

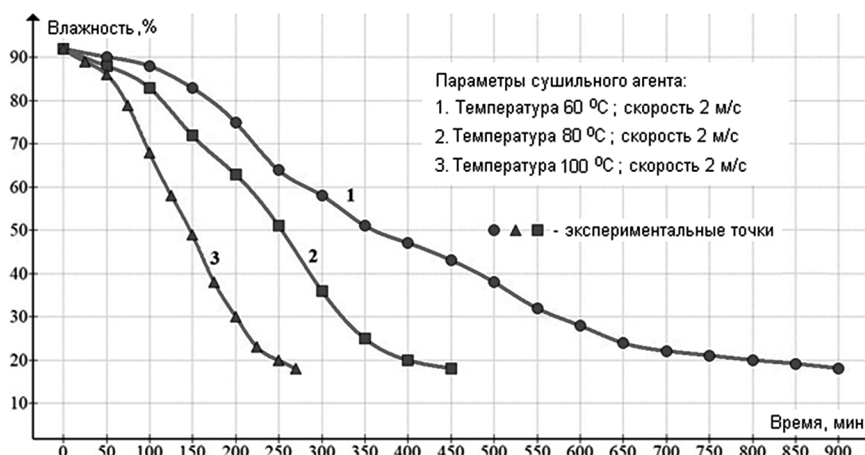


Рис. 2. Экспериментально полученные кривые конвективной сушки водорослевого сырья

Fig. 2. Experimental curves for convection drying of algae raw materials

ет, брать его в качестве варьируемого фактора не является резонным.

В процессе реализации опытной серии по определению и анализу кинетики влагоотнятия резонно найти величину удельной производительности или выхода высушенного материала, отнесенного к объему зоны сушки и ее продолжительности  $Y$ , из соотношения:

$$Y = M / \tau V, \tag{1}$$

где  $M$  — масса водорослевого сырья, подвергаемого влагоудалению, кг;  $\tau$  — продолжительность сушки, ч;  $V$  — объем рабочей камеры сушильного барабана, м<sup>3</sup>.

С целью упрощения описания кривых сушки и ее интенсивности  $\frac{d(1-W)}{d\tau} = f(1-W)$  выявлены обратные зависимости  $\tau = f(C)$  ( $C = 1 - W$  — концентрация сухих веществ в объекте сушки), которые представлены графически (рис. 2). После дифференцирования полученных уравнений  $\tau = f(C)$ , получаем зависимости:  $\frac{dC}{d\tau} = f(C)$ , проведя математическое преобразование которых, получим искомые зависимости, описывающие кривую скорости сушки исследуемого эктокарпуса:  $\frac{dC}{d\tau} = 1 / f(C)$ .

### Результаты и их обсуждение

В итоге реализации ряда опытов (табл. 2) получены кривые обезвоживания при конвективном подводе водорослевого сырья, причем некоторые из них приведены на рис. 2.

В итоге выявлена рациональная величина интенсивности перемещения теплоносителя — 2,0 м/с, его  $T = 100$  °С при поперечном размере слоевища водорослевого сырья — 95 мкм. Обоснованность величин данных факторов определяется максимумом  $Y = 25,16$  кг / (м<sup>3</sup>·ч). Заметим, что выбранные параметры сушки должны пройти проверку на температурные ограничения по водорослевому сырью путем решения уравнения тепломассопереноса, описывающее данный процесс, так как экспериментально определить температуру эктокарпуса по глубине слоя его слоевища, которая не должна превышать 60 °С, практически не представляется возможным.

Полученные результаты не противоречат с физической точки зрения известным данным [12]–[15].

На основе результатов расчетов получена аппроксимирующая зависимость удельной производительности от температуры и скорости сушильного агента:

$$Y = (-0,013T^2 + 2,095T - 77,2)V^2 + (0,034T^2 - 5,322T + 193,34)V + (-0,013T^2 + 2,198T - 77,77), \tag{2}$$

Таблица 2

### Опытные результаты изучения операции удаления влаги из водорослевого сырья

Table 2

#### Experimental results for dehydration of brown algae raw materials

Толщина слоевища водоросли, мкм	Температура сушильного агента, °С	Скорость сушильного агента, м/с	Время сушки, мин	Удельная производительность, кг / (м <sup>3</sup> ·ч)
95	60	1,0	1020	6,66
95	60	1,5	990	6,86
95	60	2,0	900	7,55
95	80	1,0	720	9,43
95	80	1,5	630	10,78
95	80	2,0	450	15,09
95	100	1,0	360	18,87
95	100	1,5	310	21,94
95	100	2,0	270	25,16
Дополнительные сведения		объем рабочей камеры 0,0053 м <sup>3</sup> масса сырья (загрузка 25% от всего объема) 0,6 кг		

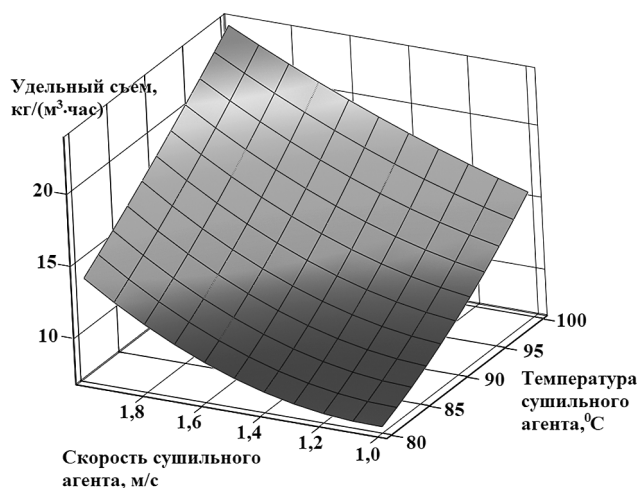


Рис. 3. Распределение  $Y$  при обезвоживании водорослевого сырья

Fig. 3. Distribution of  $Y$  at dehydration of algae raw materials

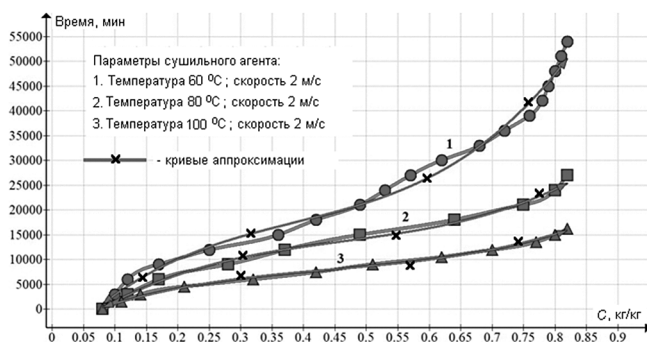


Рис. 4. Обратные зависимости  $\tau=f(C)$  кинетики сушки

Fig. 4. Inverse dependencies  $\tau=f(C)$  for drying kinetics

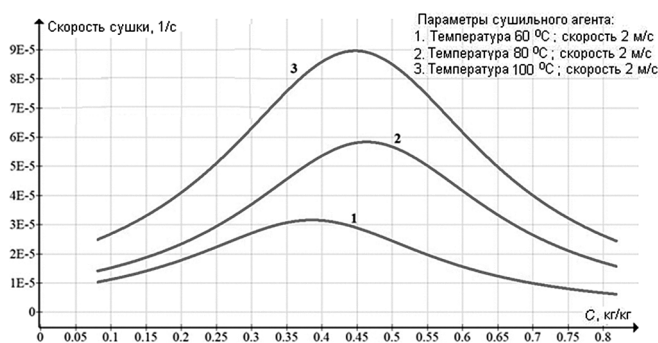


Рис. 5. Интенсивность удаления воды из водорослевого сырья

Fig. 5. Dehydration intensity of algae raw materials

где  $T$  — температура сушильного агента, °C;  $V$  — скорость сушильного агента, м/с.

На рис. 3 показана закономерность (2), откуда следует, что при повышении скорости и температуры сушильного агента наблюдается рост показателя  $Y$ .

В итоге, приходим к выводу о том, что наименьшая длительность удаления влаги до  $W_k$ , равной 18%, соответствует 270 мин (рис. 2).

Кривые сушки (рис. 4), полученные при температурах 60, 80 и 100 °C аппроксимированы полиномом третьей степени, соответственно:

$$\tau=(2,36 \cdot 10^5) C^3 - (2,73 \cdot 10^5) C^2 + (1,37 \cdot 10^5) C - 8302; \quad (3)$$

$$\tau=(1,23 \cdot 10^5) C^3 - (1,71 \cdot 10^5) C^2 + (9,64 \cdot 10^4) C - 6508; \quad (4)$$

$$\tau=(7,21 \cdot 10^4) C^3 - (9,67 \cdot 10^4) C^2 + (5,44 \cdot 10^4) C - 3428, \quad (5)$$

где  $\tau$  — продолжительность сушки, с;  $C$  — концентрация сухих веществ в водорослевом сырье, кг/кг.

Продифференцируем зависимости (3)–(5):

$$d\tau/dC=(7,08 \cdot 10^5) C^2 - (5,46 \cdot 10^5) C + 1,37 \cdot 10^5; \quad (6)$$

$$d\tau/dC=(3,69 \cdot 10^5) C^2 - (3,42 \cdot 10^5) C + 9,64 \cdot 10^4; \quad (7)$$

$$d\tau/dC=(21,63 \cdot 10^4) C^2 - (19,34 \cdot 10^4) C + 5,44 \cdot 10^4. \quad (8)$$

Получим искомые зависимости, описывающие кривую скорости сушки исследуемого эктокарпуса:

$$dC/d\tau = \frac{1}{(7,08 \cdot 10^5) C^2 - (5,46 \cdot 10^5) C + 1,37 \cdot 10^5}; \quad (9)$$

$$dC/d\tau = \frac{1}{(3,69 \cdot 10^5) C^2 - (3,42 \cdot 10^5) C + 9,64 \cdot 10^4}; \quad (10)$$

$$dC/d\tau = \frac{1}{(21,63 \cdot 10^4) C^2 - (19,34 \cdot 10^4) C + 5,44 \cdot 10^4}. \quad (11)$$

На рис. 5 проиллюстрированы математические зависимости (9), (10) и (11).

Системное изучение полученных эмпирических данных по кинетике удаления влаги при конвективном подведении тепла приводит к заключению о том, что на кинетических кривых присутствуют две стадии, что согласуется с теорией влагоудаления [10, 16].

Из полученных эмпирических результатов с учетом литературных данных о механизме влагоотнятия можно сделать вывод о том, что 1 стадия обусловлена повышением интенсивности высушивания до ее пикового значения по причине отведения в основном воды в свободном состоянии с объекта анализа. По причине интенсивного отведения паровой фазы на данной стадии минимизируется вероятность перегрева и локального подгорания водорослевого сырья, причем на данном этапе присутствует малозаметная десорбционная усадка образца, которую можно не принимать во внимание, при начале внутренней структурной организации будущей высушенной субстанции. Здесь при удалении воды из малоразмерных частиц водорослевого сырья начинает формироваться капиллярно-пористый скелет материала, что приводит к варьированию интенсивности влагоудаления и  $T$  водорослевого сырья.

По завершению данной стадии  $W$  поверхности пробы стремится к ее гигроскопической величине, далее переходя к отведению влаги с адсорбционной связью с сухим веществом, что обуславливает повышение  $T$  образца при его малозаметной усадке. На второй стадии проходе через пик интенсивности до завершения операции при повышении несоответствия между потоками влаги от поверхности водорослевого сырья подводимой изнутри образца, присутствует углубление границы об-

разовании паровой фазы в его глубь [10, 16], причем его  $T$  растет, стремясь к  $T$  теплоносителя при вероятности появления трещин на поверхности водорослевого сырья, по причине порообразования.

### Заключение

Проведено исследование кинетики удаления влаги из эктокарпуса при конвективном подводе тепла, выяв-

лены механизм обезвоживания и рациональные режимы сушки водорослевого сырья, причем характер кинетических закономерностей типичен для растительных сырьевых материалов [17] с определенной спецификой, обусловленной параметрами объекта анализа, являющегося дисперсными частицами эктокарпуса цилиндрической формы, прошедшего этап предварительной подготовки к процедуре обезвоживания.

### Литература

- Ишевский А. Л., Успенская М. В., Гунькова П. И., Давыдов И. А., Василевская И. А. Направления использования альгинатов в пищевой промышленности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 51 (77). С. 61–69.
- Попова Е. В., Морозова П. В., Успенская М. В., Радиллов А. С. Микрокапсулы из альгината натрия и карбопола: методика получения, эффективность включения и высвобождения полифенолов // Известия Академии наук. Серия химическая. 2021. № 7. С. 1335–1340.
- Хамнаева Н. И., Зверькова Я. А. Исследование свойств компонентов биоактивной упаковочной пленки // Вестник ВСГУТУ. 2021. № 4 (83). С. 37–40. DOI: 10.53980/24131997\_2021\_4\_37.
- Санаев Э. Ш., Мардонов Н. Р., Рустамова Н. А. К., Эрнazarова М. А. К. Перспективы использования растительного сырья в качестве функциональной добавки для повышения пищевой ценности мучных кондитерских изделий // Universum: технические науки. 2022. № 2–5 (95). С. 11–14.
- Горбачев А. Л. Химический состав, свойства и использование морских водорослей // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2021. № 36. С. 95–102.
- Бисенова А. Р., Мукатова М. Д. Получение полисахаридов пектиновой природы из сырья Волго-каспийского региона // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2010. № 4. С. 56–59.
- Запорожец Е. Ю., Нугманов А. Х. Х. Перспективы получения альгината натрия из бурых водорослей Каспийского моря // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2022. № 2 (74). С. 48–53. DOI: 10.24143/1812-9498-2022-2-48-53.
- Киреева М. С., Щапова Т. Ф. Материалы по систематическому составу и биомассе водорослей и высшей водной растительности Каспийского моря // Труды Института океанологии АН СССР. Т. XXIII. Биологические исследования морей. С. 125.
- Bixler H. J., Porse H. A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry // Journal of Applied Phycology. 2012. Vol. 23. pp. 321–335.
- Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.: Гостоптехиздат, 1956. 464 с.
- Куцакова В. Е., Богатырев А. Н. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке. М.: Пищевая промышленность, 1987. 236 с.
- Демидов С. Ф., Демидов А. С., Беляева С. С., Ободов Д. А., Соколова Е. А., Акжигитова А. А. Источники инфракрасного излучения с энергоподводом для термообработки пищевых продуктов // Процессы и аппараты пищевых производств. 2011. № 1. С. 113–117.

### References

- Ishevsky A. L., Uspenskaya M. V., Gunkova P. I., Davydov I. A., Vasilevskaya I. A. Directions for the use of alginates in the food industry. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2019. No. 51 (77). pp. 61–69. (in Russian)
- Popova E. V., Morozova P. V., Uspenskaya M. V., Radilov A. S. Microcapsules from sodium alginate and carbopol: production method, efficiency of incorporation and release of polyphenols. *Izvestiya Akademii Nauk. Chemical series*. 2021. No. 7. pp. 1335–1340. (in Russian)
- Khamnaeva N. I., Zverkova Ya. A. Study of the properties of the components of a bioactive packaging film. *Bulletin of the ESSTU*. 2021. No. 4 (83). pp. 37–40. DOI: 10.53980/24131997\_2021\_4\_37. (in Russian)
- Sanaev E. Sh., Mardonov N. R., Rustamova N. A. K., Ernazarova M. A. K. Prospects for the use of vegetable raw materials as a functional additive to increase the nutritional value of flour confectionery. *Universum: technical sciences*. 2022. No. 2–5 (95). pp. 11–14. (in Russian)
- Gorbachev A. L. Chemical composition, properties and use of seaweed. *Bulletin of the North-Eastern State University*. 2021. No. 36. pp. 95–102. (in Russian)
- Bisenova A. R., Mukatova M. D. Obtaining polysaccharides of pectin nature from raw materials of the Volga-Caspian region. *Rybprom: technologies and equipment for processing aquatic bioresources*. 2010. No. 4. pp. 56–59. (in Russian)
- Zaporozhets E. Yu., Nugmanov A. Kh. Kh. Prospects for obtaining sodium alginate from brown algae of the Caspian Sea. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University*. 2022. No. 2 (74). pp. 48–53. DOI: 10.24143/1812-9498-2022-2-48-53. (in Russian)
- Kireeva M. S., Shchapova T. F. Materials on the systematic composition and biomass of algae and higher aquatic vegetation of the Caspian Sea. *Proceedings of the Institute of Oceanology of the Academy of Sciences of the USSR. vol. XXIII. Biological research of the seas*. p. 125. (in Russian)
- Bixler H. J., Porse H. A decade of change in the seaweed hydrocolloids industry. *Journal of Applied Phycology*. 2012. Vol. 23. pp. 321–335.
- Lykov A. V. Heat and mass transfer in drying processes. Moscow: Gostoptekhizdat, 1956. 464 p. (in Russian)
- Kutsakova V. E., Bogatyrev A. N. Intensification of heat and mass transfer during drying. М.: Food industry, 1987. 236 p. (in Russian)
- Demidov S. F., Demidov A. S., Belyaeva S. S., Obodov D. A., Sokolova E. A., Akzhigitova A. A. Sources of infrared radiation with energy supply for heat treatment of foodstuffs. *Processes and apparatuses of food production*. 2011. No. 1. pp. 113–117. (in Russian)

13. Юнин В. А., Захаров А. М., Кузнецов Н. Н., Зыков А. В. Процесс сушки измельченного растительного материала в барабанной сушилке // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 1 (57). С. 335–349. DOI: 10.32 786/2071-9485-2020-01-33.
14. Погонец В. И. Моделирование процесса сушки морепродуктов во взвешенно-закрученных потоках // Научные труды Дальрыбвтуза. 1988. № 10. С. 14–20.
15. Андреева Е. В., Евсеева С. С., Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х.-Х. Гигроскопические свойства водорастворимых антоциановых комплексов, выделяемых из плодово-ягодного сырья // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 45–52. DOI: 10.17 586/1606-4313-2020-19-4-45-52
16. Алексанян И. Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения: автореф. дис.... доктора техн. наук: 05.18.12. М., 2001. 52 с.
17. Лазин П. С., Щербakov С. Ю. Применение барабанных сушильных установок для интенсификации процесса сушки плодово-ягодной продукции // Инновационные технологии и технические средства для АПК. 2016. С. 115–119.
13. Yunin V. A., Zakharov A. M., Kuznetsov N. N., Zykov A. V. The process of drying crushed plant material in a drum dryer. *Proceedings of the Nizhnevolzhsky agrouniversity complex: Science and higher professional education*. 2020. No. 1 (57). pp. 335–349. DOI: 10.32 786/2071-9485-2020-01-33. (in Russian)
14. Pogonets V. I. Simulation of the process of drying seafood in suspended-swirling flows. *Scientific works of Dalrybvtuz*. 1988. No. 10. pp. 14–20. (in Russian)
15. Andreeva E. V., Evseeva S. S., Alexanyan I. Yu., Nugmanov A. H.-H. Hygroscopic properties of water-soluble anthocyanin complexes isolated from fruit and berry raw materials. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No 4. p. 45–52. DOI: 10.17 586/1606-4313-2020-19-4-45-52
16. Aleksanyan I. Yu. Development of scientific foundations for the processes of high-intensity drying of products of animal and vegetable origin: Abstract of the thesis, dis....doctor of tech. Sciences: 05.18.12. M., 2001. 52 p.
17. Lazin P. S., Shcherbakov S. Yu. Application of drum dryers for the intensification of the drying process of fruit and berry products // *Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex*. 2016. pp. 115–119.

### Сведения об авторах

#### Запорожец Екатерина Юрьевна

Кафедра «Технологические машины и оборудование», Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, mail\_legato@mail.ru

#### Фоменко Екатерина Валерьевна

К. т. н., младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Пищевые системы и биотехнологии», Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, tetatet. 78@mail.ru

#### Нугманов Альберт Хамед-Харисович

Д. т. н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, albert909@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4093-9982

#### Алексанян Игорь Юрьевич

Д. т. н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, 16081960igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-5494-1226

#### Котельников Андрей Вячеславович

Д. б. н., доцент, Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16

#### Во Чунг Куанг

Аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», Астраханский государственный технический университет, 14056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, ngocsenqb@gmail.com

### Information about authors

#### Zaporozhch Ekaterina Yu.

Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16, mail\_legato@mail.ru

#### Fomenko Ekaterina V.

Ph. D., Junior Researcher of Research Laboratory of Food Systems and Biotechnologies, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16, tetatet. 78@mail.ru

#### Nugmanov Albert H.-H.

D. Sc., Professor of Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16, albert909@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4093-9982

#### Aleksanian Igor Yu.

D. Sc., Professor of Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16, 16081960igor@gmail.com. ORCID 0000-0001-5494-1226

#### Kotelnikov Andrey V.

D. Sc., Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16

#### Vo Chung Kuang

Graduate student of Department of Technological Machines and Machinery, Astrakhan State Technical University, 14056, Russia, Astrakhan, Tatishchev St., 16, ngocsenqb@gmail.com

